

引用格式: 陆嘉琛, 张昌民, 王令辉, 王浩楠, 孙家惠, 张祥辉, 郭俊, 杨雨欣. 河流扇砾石粒径递减规律定量分析——以柴达木大格勒河为例[J/OL].

沉积学报, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.050. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.050.[LU JiaChen, ZHANG ChangMin, WANG LingHui, WANG HaoNan, SUN JiaHui, ZHANG XiangHui, GUO Jun, YANG YuXin. Quantitative Analysis of Downstream Fining Pattern in Fluvial Fans: A case study of the Dagele River, Qaidam Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.050. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.050.]

河流扇砾石粒径递减规律定量分析

——以柴达木大格勒河为例

陆嘉琛, 张昌民, 王令辉, 王浩楠, 孙家惠, 张祥辉, 郭俊, 杨雨欣

长江大学地球科学学院, 武汉 430100

摘要 【目的】建立定量的大型分支河流体系（河流扇）沉积物粒度递减模型，为预测沉积体系展布提供依据，服务智能油气勘探与开发。【方法】利用 Google Earth、91 卫图等地理信息软件，结合野外现场考察，对青海柴达木盆地大格勒河河流扇的河道形态和沉积物粒度进行精细描述，使用 imageJ 等软件测量研究区砾石粒径，选择合适的方法拟合粒径递变曲线，总结砾石粒径的沿程变化规律。【结果】结果发现：大格勒河扇沉积物粒度整体以砾石为主，顶点最大砾石粒径可达 90 cm，从顶点向末端具有明显的递减特征；指数函数能够更好拟合河流扇沉积物的砾石粒径递变趋势，最大砾石粒径随距离变化的拟合函数为 $D_{\max}=90e^{-0.264x}$ ，平均砾石粒径随距离变化的拟合函数为 $\bar{D}=7.04 e^{-0.11x}$ ；通过比较最大砾石粒径与平均砾石粒径的指数拟合模型，指出水力分选在沉积物粒径递减中的重要作用，同时认为以最大砾石粒径的沿程递减模型能够较好反映全分支河流体系（本研究段）的粒度变化趋势，由此建立了大格勒河分支河流体系沉积物递减模式。【结论】沉积物粒度变化与物源供给、水动力条件及沉积环境等因素有关，本研究为定量预测大型分支河流体系（河流扇）的相带变化和沉积体系规模提供了知识库信息。

关键词 分支河流体系；沉积物粒度；定量分析；柴达木盆地；大格勒河流扇

第一作者简介 陆嘉琛，男，2001 年出生，硕士研究生，沉积学，E-mail: ljc54921@163.com

通信作者 张昌民，男，教授，沉积学与石油地质学，E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

文章编号: 1000-0500(2025)00-0000-00

0 引言

河流扇和冲积扇沉积蕴藏大量的油气资源，是陆相盆地中重要的油气储层。我国新疆（杨帆和贾进华，2006；吴胜和等，2012）、中原（吴智勇等，1999）、大港（兰亚萍等，2009）、冀东（徐安娜等，2006）等油田广泛发育河流扇、冲积扇及其相关的扇三角洲沉积，对河流扇沉积体系分布范围及其沉积物粒度等特征的预测对油气勘探和开发十分重要。长期以来，沉积学和石油地质学对河流扇和冲积扇沉积体系及其相模式的定性总结已经非常成熟（Agarwal and Bhoj, 1992；Blair, 1999；Blair and McPherson, 2009；Clarke et al., 2010；刘宗堡等，2018；张元福等，2020，2023；李相博等，2021；孙家惠等，2024；王令辉等，2025），但对河流扇沉积体系规模及其沉积相分布的定量预测还缺乏有效的手段。随着油气

勘探开发向深层、低渗透等领域推进,勘探风险和勘探成本越来越高,实现对沉积体系的智能化研究,以及在勘探早期对储层沉积体系的分布做出定量预测成为提高勘探开发效益的当务之急,同时也为河流沉积学研究提出了新的目标。近年来,张昌民等人致力于分支河流体系(distributive fluvial systems,以下简称DFS)的研究(Hartley et al., 2010; Weissmann et al., 2010; 张昌民等, 2017, 2020, 2023; 张祥辉等, 2019),按照分支河流体系的观点对冲积扇、河流扇和巨型扇进行系统分类,将沉积体系规模小于30 km的冲积扇划归小型分支河流体系,沉积体系规模在30 km~100 km的冲积扇划归大型分支河流体系,沉积体系规模大于100 km的冲积扇划归巨型分支河流体系。

沉积学、地理学和水文学对河流体系沉积物粒度随搬运距离递减的趋势关注已久,已经发表的粒度递减模型和学术论文众多。Sternberg(1875)首次从动力学的角度阐释了砾石粒径与搬运距离的定量关系,提出了磨损定理,即粗颗粒在向下游搬运的过程中通过表面摩擦与破裂变成细颗粒;Daubrée(1879)应用滚筒模拟实验对沉积物粒径的变化规律进行研究,揭示了沉积物的分选规律,指出沉积物在向下游搬运的过程中,粗颗粒优先沉积,细颗粒优先搬运,即选择性沉积(选择性搬运)。Barrell(1925)将莱茵河的沉积物粒径随搬运距离变化规律以负指数的形式表达出来;Krumbein(1937, 1942)通过系统研究海滩砾石粒径随搬运距离的变化规律,把用负指数拟合的沉积物粒径和搬运距离之间的定量规律定义为Sternberg公式,并且在阿罗约塞科河的洪水沉积砾石粒径与搬运距离之间的规律中验证了此公式。但是由于不同研究者选择的河流类型不同,缺乏能够适用不同沉积体系规模预测的粒度递减模型。王洋等(2025)类比不同拟合方法,通过适应性分析建立了准噶尔南缘喀拉扎组砾石粒径随搬运距离变化规律的定量关系模型并对沉积体系的展布进行预测,为沉积体系定量预测提供了一定的参考依据,为沉积物粒径沿程变化规律的研究提供了新的思路。

尽管前人对沉积物粒度的沿程变化规律进行了大量研究,已建立了多种粒度递减模型,但其适用性仍存在较大争议,尤其对不同规模、不同气候背景下DFS中规律的研究较少、认识不足。研究以青海柴达木盆地大格勒河流扇为对象,聚焦于构建分支河流体系的粒度递减模型,探索此类沉积体系的粒度变化规律,建立河流扇沉积物粒度沿程递变定量模型,以期能够利用定量的粒度变化模型,为预测地下沉积体系展布提供定量的理论基础和技术支持。

1 研究区概况

大格勒河流扇位于柴达木盆地的东南部(图1a)、青海省格尔木市大格勒乡辖区内,地处东昆仑造山带中段北缘(王富春和王贵仁, 2001; 焦和, 2013)。该地区气候干燥,降雨

少，年均降雨量约为 38.8 mm，降雨多集中在 7~8 月；蒸发大，年均蒸发量约为 2430.8 mm。年均气温仅为 4.2 °C，昼夜温差大，每年仅冬夏两季，冬长夏短；每年 9 月至次年 6 月寒冷多风，属于寒冷一半干旱的大陆性高原气候（王富春和王贵仁，2001；焦和，2013）大格勒河为一季节性河流，水源以冰雪融水、大气降水和地下水补给为主（王富春和王贵仁，2001），河流源于东昆仑布尔汗布达山北麓，向北流入察尔汗盐湖，沉积物堆积形成河流扇。

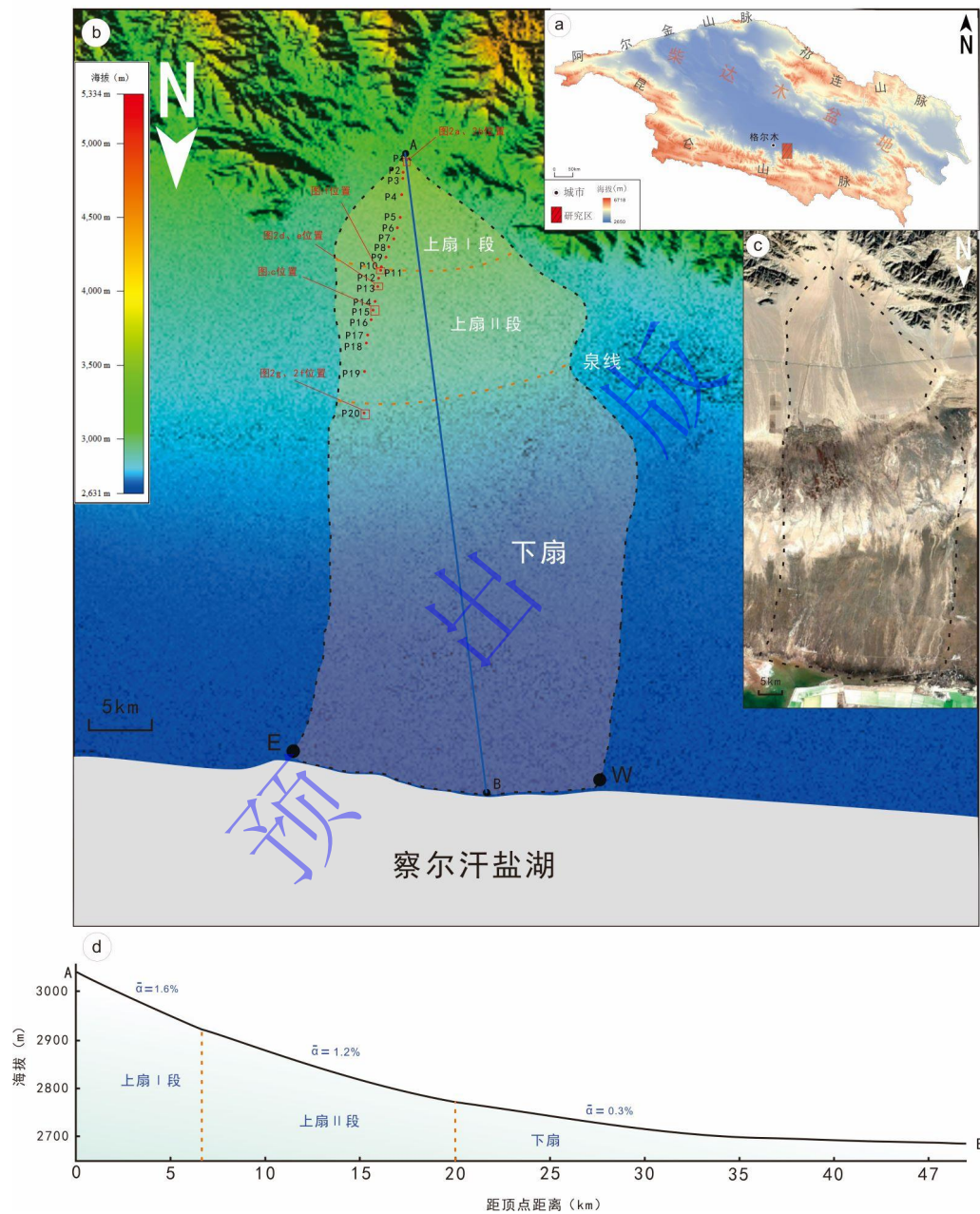


图 1 研究区概况

(a) 大格勒河扇的地理位置；(b) 大格勒河扇体形态、分布范围、相带分区、考察点分布；(c) 大格勒河扇卫星影像；(d) 大格勒河扇地形坡降剖面图（高程数据与卫星影像分别来自 ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据、Google Earth）

Fig.1 Overview of the study area

(a) geographic position of Dagale fluvial fan; (b) morphology, distribution range, facies distribution with the sampling points location of Dagale fluvial fan; (c) satellite image of Dagale fluvial fan; (d) fan surface slope gradient profile

大格勒河流扇顶点位于 $36^{\circ}16'26.79''\text{N}$ 、 $95^{\circ}42'56.50''\text{E}$ ，其东端位于 $36^{\circ}39'18.83''\text{N}$ 、 $95^{\circ}52'15.66''\text{E}$ （图 1b 中的 E 点），西端位于 $36^{\circ}41'45.66''\text{N}$ 、 $95^{\circ}34'50.56''\text{E}$ （图 1b 中的 W 点），端点间跨度 26.33 km；扇体半径约为 47 km，面积约 863 km²，根据张昌民等（2023）的分类，为大型 DFS 范围，属于河流扇。大格勒河流扇顶点以上为流域盆地物源区，顶点以下为河流扇本体。扇体呈南北向展布（图 1b），地势南高北低，由于山脉阻隔、地形、风向等多种因素影响，扇体形态呈现一定的不对称性，整体向西偏移，河流出口海拔 3 041 m，末端海拔 2 665 m，高程差 376 m，轴向平均坡度比 0.8%（图 1c）。

根据河道形态、沉积物特征、扇面地貌和植被发育特征，以泉线为界将扇体分为上下两个部分（图 1b）。上扇部分长 20 km 左右，约占扇体总长度 42.6%，本部分在平面呈明显的三角形形态，河道顺直、缺少植被，沉积物裸露。根据沉积物粒度特征又可以分为 I、II 两段，I 段为砾石平原，在距离顶点 0~6.5 km 范围内，占 DFS 总长度 13.8%，坡度比 1.6%，河道以下切的辫状河为主（图 2a），向下游逐渐变宽变浅；沉积物以漂砾为主，最大砾石粒径达数十厘米，漂砾间填充粗砾质沉积物（图 2b）；II 段在距顶点 6.5~20 km 范围内，占 DFS 总长度 28.8%，坡度比 1.4%。本段河道向下游明显变宽变浅，演变为小型宽浅河道（图 2c）和片流水道（图 2d）。沉积物以粗砾、中砾和砂质为主（图 2e），部分位置见有漂砾（图 2f），扇面上有零星植被发育。下扇区位于顶点 20 km 以下区域，占沉积体系长度约 57.4%，地表坡度 0.3%。本区沉积物以砂质为主（图 2g），向湖区变细，大部分被开垦为农耕区（图 2h），区域内河道弯曲度明显增加，植被覆盖明显增强，向湖区演变为沼泽和盐碱湖滩。本次重点研究上扇区域的沉积物粒度递减规律。



图2 大格勒河流扇分区河道形态、沉积物粒度特征

(a) 上扇 I 段下切河道形态；(b) 上扇 I 段的漂砾和粗砾沉积物；(c) 上扇 II 段的宽浅河道；(d) 上扇 II 段的片流水道；(e) 上扇 II 段的砂砾质沉积；(f) 上扇 II 段的漂砾和粗砾沉积；(g) 下扇的细砂质沉积；(h) 下扇农田和水利设施

Fig.2 Channel morphology and sediment grain-size characteristics of the Dagle fluvial fan

(a) incised channel in the upper fan, section I; (b) boulders and coarse gravel sediments in the upper fan, section I; (c) wide and shallow channel in the upper fan, section II; (d) sheet flow paths in the upper fan, section II; (e) sandy-gravelly deposits in the upper fan, section II; (f) boulders and coarse gravel sediments in the upper fan, section II; (g) fine sandy deposits in the lower fan area; (h) farmland and water conservancy facilities in the lower fan area

2 数据采集

考察中沿流向共布置 20 个考察点（图 1b），泉线以下区域难以进入，故本研究只对泉线以上的区域进行考察和研究，考察内容包括地貌特征、沉积物粒度特征等，其中对 15 个点位（P1、P4~P18）的砾石直径进行测量，根据沉积物粒度变化及采样难易度对 7 个点位（P14~P20）进行了采样。大格勒河流扇沉积物粒度横跨漂砾到粉砂等不同区间，粒度差别极大，且多为较粗砾石，单一的粒度分析方法无法完成对全区域粒度样本的分析。本次研究采用野外考察和室内分析相结合的方法，针对不同粒径沉积物采用直接测量法、筛析法以及激光粒度仪法等方法获得沉积物的粒度数据。

2.1 直接测量法

由于砾石的磨圆度和球度不是本次研究的重点，以砾石的长轴作为砾石粒径的代表，没有测量砾石其他轴向的尺度。在现场测量中，对于直径 10 cm 以上的漂砾和粗砾，利用卷尺直接测量其砾石粒径（图 3a），对砾石粒径 10~1 cm 的砾石分布区，通过野外拍摄的高清砾石照片，采用 imageJ 软件测量砾石 a 轴长度（图 3b）；对直径小于 1 cm 的砾石等沉积物，采用筛析法进行粒度分析。研究共布置 15 个砾石测量点，在每个测量点采集砾石样本 150 个以上，获得砾石粒径数据共 2 778 个（表 1），以此统计研究区砾石最大砾石粒径、平均砾石粒径，其中平均砾石粒径为单个采样点所有样本的算术平均数。

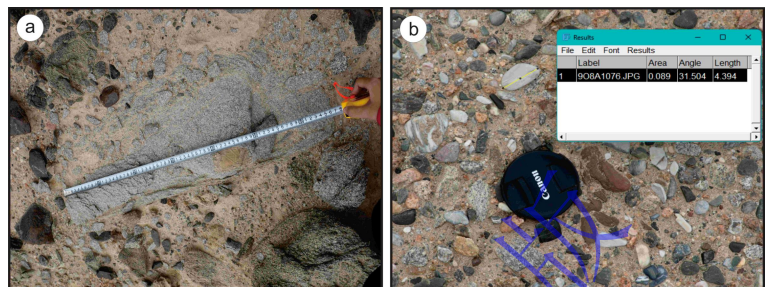


图 3 直接测量法示意图

(a) 卷尺直接测量; (b) imageJ 软件测量

Fig.3 Schematic diagram of direct measurement methods

(a) direct measurement by tape measure; (b) measurement using imageJ software

表 1 研究区的最大砾石粒径和平均砾石粒径

Table 1 Maximum and average gravel diameters in the study area

点位	距顶点距离/km	样本数	最大砾石粒径/cm	平均砾石粒径/cm	测量方法
P1	0.00	156	90.00	7.04	直接测量法
P4	2.33	151	36.00	4.79	直接测量法
P5	3.37	173	55.30	4.75	直接测量法
P6	4.02	203	19.50	4.16	直接测量法
P7	4.69	254	38.55	6.38	直接测量法
P8	5.26	151	12.24	3.13	直接测量法
P9	5.94	150	23.12	4.48	直接测量法
P10	6.63	186	19.88	4.21	直接测量法
P11	7.16	177	9.70	4.04	直接测量法
P13	8.08	200	9.53	2.91	直接测量法
P14	8.69	179	6.95	2.97	直接测量法
P15	9.78	299	7.67	2.29	直接测量法
P16	10.48	154	5.30	1.28	直接测量法
P17	10.87	152	5.61	1.61	直接测量法
P18	12.17	193	3.76	1.63	直接测量法
P19	14.32			0.50	筛析法
P20	17.54			0.44	筛析法

2.2 筛析法

直径 1 cm 以下的细小砾石和其他沉积物通过筛析法进行粒度分析。首先将样品编号记录放至烧杯中用清水浸泡，以去除样品中的盐类等杂质（图 4a），将植物根茎等较大杂物用镊子移除，随后加入过氧化氢消毒，将泥质、砂质样品分别放至石墨烯加热板及烘干箱中烘干，以进行后续工作。筛析时以 0.25Φ 为间隔，将筛网按照筛孔大小排列（图 4b），从上至下依次为 -3Φ 、 -2.75Φ 、 -2.5Φ 、 -2Φ 、 -1.75Φ 、 -1.5Φ 、 -1.25Φ 、 -1Φ ，最底部放置接收盘，在烧杯中取出适量样品称重，将样品均匀倒入最上层筛网，水平摇晃筛网，使样品经筛网逐级筛分，逐层取下筛网，用天平称出各自的质量，并求出百分比含量（表 1），以获得样品中砾质含量，并用加权法求出平均粒径（表 2）。直径小于 2 mm 的沉积物采用激光粒度分析仪直接分析。

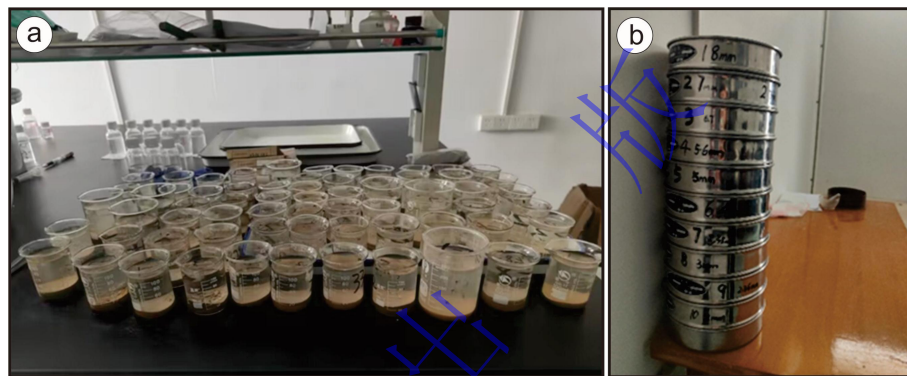


图 4 筛析法示意图

(a) 样品预处理；(b) 筛网排列示意

Fig.4 Schematic diagram of sieving method

(a) sample pretreatment; (b) schematic diagram of sieve arrangement

表 2 所采样品的沉积物粒度组分含量

Table 2 Grain-size proportion of sample sediments

点位	距顶点距离/km	砾质含量/%	砂质含量/%	粉砂及泥质含量/%
P14	8.69	36.69	10.15	53.16
P15	9.78	60.84	16.15	23.01
P16	10.48	51.02	37.20	11.78
P17	10.87	72.84	23.80	3.36
P18	12.17	61.60	21.62	16.78
P19	14.32	28.53	53.33	18.14
P20	17.54	18.60	64.34	17.06

2.3 激光粒度仪法

激光粒度仪法的基本原理为利用颗粒在激光照射下产生的散射光强分布，计算颗粒的粒

径分布,该方法适用于砂泥质等细颗粒(<2 mm)的粒径测量,实验使用的仪器为美国 Ls13320 激光粒度分析仪。首先将样品磨成粉末状放入仪器量筒内,选择 Use optical Module (光学模块),选择 STAND.SOP 文件设定样品模块单元,开启鼓风机制造真空环境,点击 Start 按钮,机器会自动进行分析,同样以 0.25 Φ 为间隔,获得样品中砂质、粉砂质及泥质沉积物的粒度分布和砂质、粉砂质及泥质沉积物的含量(表 2)。

3 沉积物粒径递减定量表征

研究选择最大砾石粒径与平均砾石粒径作为主要参数,最大粒径指示了搬运介质的临界起动能力或最大搬运能力,同时可以很好地反映物源供给;而平均粒径则指示了搬运介质的平均持续能量或稳态搬运能力,受到物源、分选作用、搬运距离等多种因素的综合影响,可以更综合地反映水动力条件。现场考察和粒度分析结果发现,大格勒河流扇沉积物在距离顶点的 7 km 处出现显著砾石粒径突变,在 13 km 处出现显著的砾质含量突变。受此影响, P18 点以上的粒度变化趋势与 P19、P20 明显不同,本文主要研究 P18 点以上游沉积物粒度递减规律。

3.1 沉积物粒径递减的表征方法

前人对沉积物粒径随搬运距离的递减现象做了大量的研究(吴锡浩和钱方, 1964; Brierley and Hickin, 1985; Rice, 1999; Duller *et al.*, 2010; Whittaker *et al.*, 2011; Dingle *et al.*, 2016; 陈进军, 2017; 陈殿宝等, 2018; 高志勇等, 2023), 目前常见的粒径递减规律的表征方法主要有一元线性拟合方法、幂函数拟合方法以及基于 Sternberg 定理的指数拟合方法(图 5)。

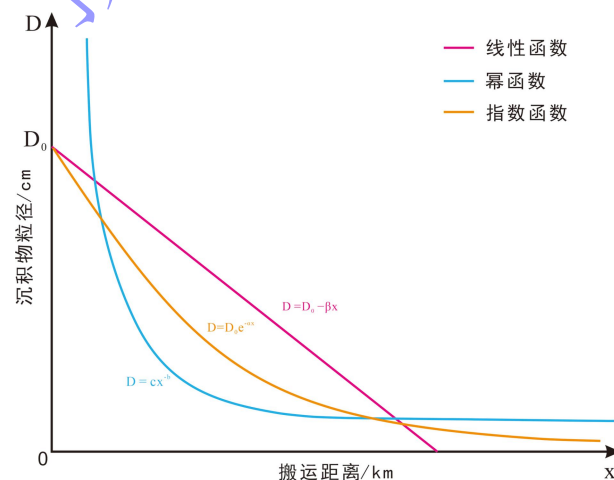


图 5 沉积物粒径递减表征的三种方法

Fig.5 Three methods of characterizing downstream sediment grain-size decrease

一元线性拟合法即通过建立沉积物粒径与搬运距离之间的线性方程实现二者的定量表

征, x 轴为沉积物搬运距离, y 轴为沉积物粒径, 其数学表达式如下 (Rice, 1999):

$$D = D_0 - \beta x \quad (1)$$

式中: x 为搬运距离; D 为搬运距离为 x 时的沉积粒径; D_0 为搬运前的粒径, 即初值粒径; β 为粒径细化速率。函数曲线与 y 轴的交点为初值粒径 (D_0)。吴锡浩和钱方 (1964) 曾建立长江川江段沉积物粒径—搬运距离线性模型。高志勇等 (2023) 为解释干旱气候下冲积扇—冲积平原曲流河的沉积演化过程, 建立了库车河现代沉积砾石粒径变化与搬运距离的线性关系模型。Whittaker *et al.* (2011) 应用一元线性拟合方法建立波布拉盆地的 5 个冲积扇的定量模型, 并得出对搬运距离小于 10 km 的沉积体系线性拟合的效果较好。符合一元线性拟合方法的例子较少, 在对规模较小、沉积环境稳定的近源沉积体系的应用上有较好的拟合程度。

幂函数拟合法的表达式为 (Brierley and Hickin, 1985):

$$D = cx^{-b} \quad (2)$$

式中, b 为粒径递变系数; c 为拟合常数。Brierley and Hickin (1985) 建立了斯阔米什河沉积物粒径沿程变化的幂函数模型。Rice (1999) 在对比了各个拟合方法后发现幂函数的拟合效果在大多数情况下都不好。幂函数拟合法在斯阔米什河上的应用仅为个例, 反映了沉积物粒径递减速率在上游极快, 下游则极慢, 适用范围有限, 是否存在普遍规律并且适用于 DFS 体系还有待证明。

指数拟合方法的基本表达式为 (Krumbein, 1942):

$$D = D_0 e^{-\alpha x} \quad (3)$$

式中, α ——沉积物粒径细化系数 (细化率)。陈进军 (2017) 对祁连山北麓的 5 个冲积扇的沉积物粒径沿程变化应用指数拟合方法皆取得了不错的效果。陈殿宝等 (2018) 建立了梨园河沉积物粒径的指数关系模型。Rice (1999) 指出指数拟合模型在多数情况下更适用于沉积物递减的表征。指数关系在沉积物粒径沿程变化研究中已得到大量的证实和应用, 在各个沉积体系中应用的适用性较好, 对粒径细化系数 α 的研究也更加深入, 部分的研究表明 α 值越大反映沉积物粒径细化速率越快 (Duller *et al.*, 2010; Dingle *et al.*, 2016; 陈殿宝等, 2018)。

3.2 最大砾石粒径变化规律

对于粗粒沉积而言, 最大粒径作为表征沉积动力的关键参数 (Blair, 1999, 2000), 是水动力条件和能量最直观的体现。大格勒河流扇砾石粒径整体上较粗 (表 1, 表 2), P1 点最大砾石粒径即初值砾石粒径为 90 cm, 随着河道向下游方向水动力不断衰减及河道规模和流量不断减小, 最大砾石粒径递减。到测量点 P18 最大砾石粒径已降低至 3.76 cm, 下降了 95.8%。P18 与 P19 之间发生了从砾质沉积向砂质沉积的突变。使用不同的拟合函数对研究区最大砾

石粒径 ($D_{\max}$) 沿程变化进行拟合, 筛选最有利的砾石粒径递减定量关系模型, 使用的数据为 P1 到 P18 之间的最大砾石粒径。

3.2.1 线性函数拟合

运用一元线性函数得到的拟合关系为:

$$D_{\max} = 90 - 9.26x \quad (4)$$

其中 $D_{\max}$ 为最大砾石粒径 (单位: cm), x 为沉积物搬运距离 (单位: km), 砾石粒径递减系数 $\beta=9.26$, 拟合优度 $R^2=0.68$ 。分析拟合曲线 (图 6a) 可以发现, 此方法的拟合结果与实际数据点的偏差较大, 拟合程度一般, 平均误差为 146.33%, 最大误差可达 703.57%。根据该拟合曲线推测, 最大砾石粒径在距离定点 10 km 已递减为 0, 与实际情况相差很大。

单一的线性关系难以反映砾石粒径的变化, 从最大砾石粒径分布散点图上可以看到, 采样点 P10 与 P11 之间最大砾石粒径发生明显突变, 线性关系无法表达这一突变。为此采用分段拟合的方法, 使用一元线性函数进行拟合, 分段建立的定量关系分别为:

$$D_{\max} = 90 - 12.6x(P1-P10) \quad (5)$$

$$D_{\max} = 18.52 - 1.21x(P11-P18) \quad (6)$$

此两个关系式的 R^2 分别为 0.89 和 0.87, 均有较高的拟合程度, 平均误差为 30.21%, 其中上半段 (公式 5) 的误差为 49.98%, 下半段 (公式 6) 的误差为 7.61%, 表明如此拟合可以较好地反映最大砾石粒径的递减速率。砾石粒径递减系数 β 分别为 12.6 和 1.21, 说明上半段的递减速率明显高于下半段, 此现象与实际情况相吻合。综上所述, 单一的一元线性函数对大格勒河流扇最大砾石粒径沿程变化的拟合效果不好, 但分段拟合可以较好地表征最大砾石粒径的递减规律。

3.2.2 幂函数拟合

应用幂函数对最大砾石粒径进行拟合, 得到的定量关系为:

$$D_{\max} = 117.5x^{-1.06} \quad (7)$$

其中粒径递变系数 $b=1.06$, 拟合优度 $R^2=0.58$ 。对比实际砾石粒径分布散点图显示基于幂函数建立的砾石最大粒径随搬运距离的定量关系与实际的砾石粒径分布拟合性较差, 平均误差为 51.86%, 且由于幂函数不存在截距 (极值), 在接近扇顶点时的砾石粒径趋于正无穷 (图 6b), 对顶点的初值砾石粒径无法表征, 难以用于沉积体系的顶点预测。因此幂函数不适合用于表征研究区最大砾石粒径递减规律。

3.2.3 指数函数拟合

利用基于 Sternberg 定理的指数拟合关系模型对大格勒河流扇的沉积物最大砾石粒径分布进行结合，获得的定量关系为：

$$D_{\max} = 90e^{-0.26x} \quad (8)$$

其中拟合优度 $R^2=0.88$ ，细化系数 $\alpha=0.26$ ，拟合曲线如图 6c 所示。结果表明，指数函数分布与研究区最大砾石粒径的沿程变化具有较高的拟合程度，平均误差仅为 26.48%，基本可以反映最大砾石粒径随搬运距离的变化规律。表明随着搬运距离的增加，河流扇沉积物的最大粒径随搬运距离向下游呈现指数递减。

对比不同拟合方法表明，基于指数函数的定量关系模型能够更好地表征大格勒河流扇最大砾石粒径的沿程变化规律，符合实际的最大砾石粒径变化规律，由此建立的最大砾石粒径和搬运距离之间的定量关系更加符合实际情况。同时，以最大砾石粒径突变点为界线，采用分段式一元线性拟合也取得了不错的效果，基本可以反映最大砾石粒径的递减规律。

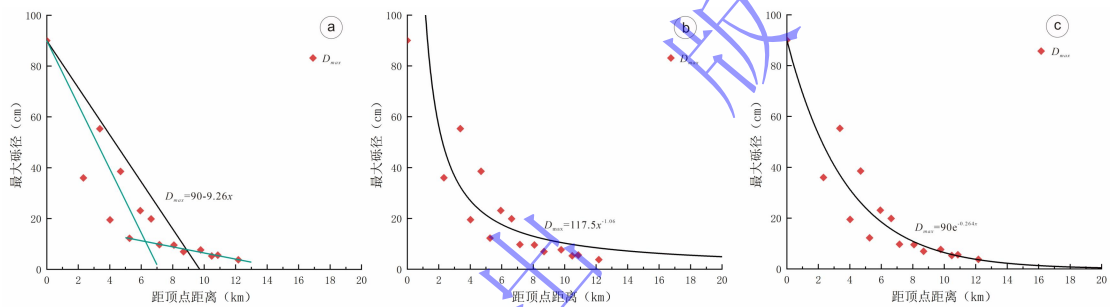


图 6 最大砾石粒径拟合曲线

(a) 最大砾石粒径线性函数拟合曲线；(b) 最大砾石粒径幂函数拟合曲线；(c) 最大砾石粒径指数函数拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of maximum clast size

(a) linear function; (b) power function; (c) exponential function

3.3 平均砾石粒径变化规律

大格勒河流扇 P1 点的平均砾石粒径即初值砾石粒径 D_0 为 7.04 cm，至点 P18 即搬运距离 12.17 km 时，平均粒径递减为 1.63 cm，减少了 76.8%。同样对砾石的平均粒径依照上述三种拟合方法进行拟合并进行适应性分析。

3.3.1 线性函数拟合

对研究区砾石平均粒径进行线性拟合，得到线性拟合定量公式：

$$\bar{D} = 7.04 - 0.49x \quad (9)$$

其中砾石粒径递减系数 $\beta=0.49$ ，拟合优度 $R^2=0.96$ ，拟合程度较高，平均误差为 18.59%，表明平均砾石粒径随着搬运距离的增加具有明显的线性递减特征（图 7a），基本可以表征各测量点间的平均砾石粒径变化规律。但由于其反映沉积物粒径递减速率恒定，具有一定的局限性，无法表征沉积体系上下游的粒径分异特征。

3.3.2 幂函数拟合

根据幂函数对研究区平均砾石粒径沿程变化拟合的公式为：

$$\bar{D}=9.26x^{-0.54} \quad (9)$$

其中粒径递变系数 $b=0.54$ ，拟合优度 $R^2=0.5$ ，拟合效果较差，拟合曲线见图 5a，曲线中反映平均砾石粒径递减速率在上游过快，下游过慢(图 7b)，点位 P16~P18 平均误差为 69.78%，函数图像与 y 轴不相交，无初值砾石粒径 (D_0)，难以很好的反映平均砾石粒径递减特征，且幂函数式中各参数的意义不明确，不能量化的表现平均砾石粒径的递减速率，因此基于幂函数拟合方法建立的定量模型不适用于研究区平均砾石粒径的表征。

3.3.3 指数函数拟合

采用指数拟合方法对平均砾石粒径建立的定量关系为：

$$\bar{D}=7.04 e^{-0.11x} \quad (11)$$

其中细化系数 $\alpha=0.11$ ， $R^2=0.77$ ，具有较好的拟合度，平均误差为 19.77%，对平均砾石粒径递减规律的表征同样具有较为理想的效果(图 7c)，且相较于线性模型的恒定细化速率，指数函数的细化系数 α 量化了动力系统的能量耗散梯度。根据 Whittaker *et al.* (2011) 提出的“中程搬运非线性主导”理论，当搬运距离超过 10 km 时，线性模型的误差率显著上升，而指数模型仍保持较高的预测精度，指数模型在搬运距离延伸更远的范围中具有更好的适用性，在沉积体系范围的预测中有更好地表现。

虽然线性拟合对平均砾石粒径的递减速率有很好的表征，但其延伸距离不足，仅在较小的沉积规模内有比较好的效果。综上所述，指数拟合更符合对大格勒河扇平均砾石粒径的定量表征。

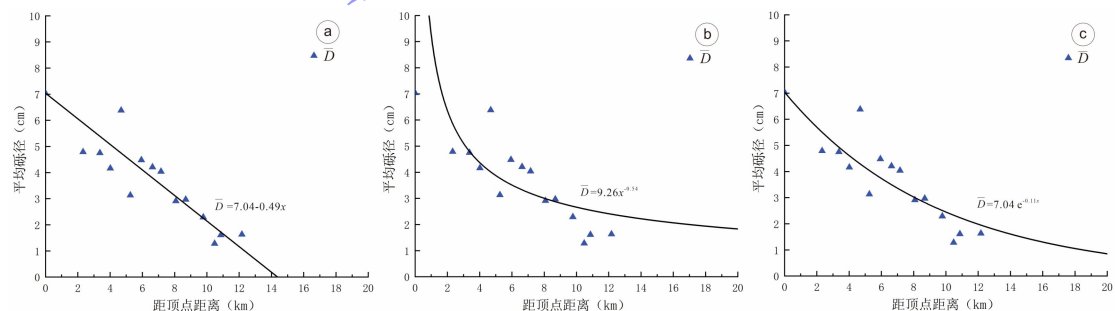


图 7 平均砾石粒径拟合曲线

(a) 平均砾石粒径线性函数拟合曲线；(b) 平均砾石粒径幂函数拟合曲线；(c) 平均砾石粒径指数函数拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of mean clast size

(a) linear function; (b) power function; (c) exponential function

4 讨论

4.1 最大砾石粒径和平均砾石粒径反映的递减规律的差异性

根据上述分析,大格勒河扇最大砾石粒径与平均砾石粒径的递减规律均符合根据指数拟合方法建立的定量关系模型且有不错的拟合效果,这与前人研究中对于搬运距离大于 10 km 的沉积体系指数模型的效果更好的结论相符合,指数模型显示了砾石粒径的递减速率在前半段远超后半段,曲线随着搬运距离增加逐渐变缓,在最大砾石粒径曲线中尤为明显,这是由于最大砾石粒径指示搬运水动力的峰值能量,对水动力的反映更为直接,这很好地揭示了水流搬运能量向下游的衰减速率逐渐变小。对比最大砾石粒径与平均砾石粒径的指数拟合定量关系模型,砾石粒径细化系数分别为 0.26 和 0.11,整体上最大砾石的粒径细化快于平均砾石粒径,从拟合曲线中也可见平均砾石粒径的曲线明显较最大砾石粒径平缓(图 8),但最大砾石粒径递减曲线在后半段明显变缓,而平均砾石粒径变缓的趋势则不明显,这种现象的出现说明了水力分选在砾石粒径细化中的作用,在搬运的过程中粗粒沉积物被优先沉积,而细粒的沉积物则优先被搬运,即“选择性沉积”。结合野外观察,并未发现砾石的磨圆度有明显的变化,所以磨损效应在研究区砾石粒径细化过程中的作用很小,认为水力分选导致的选择性沉积为粒径细化的主要因素。

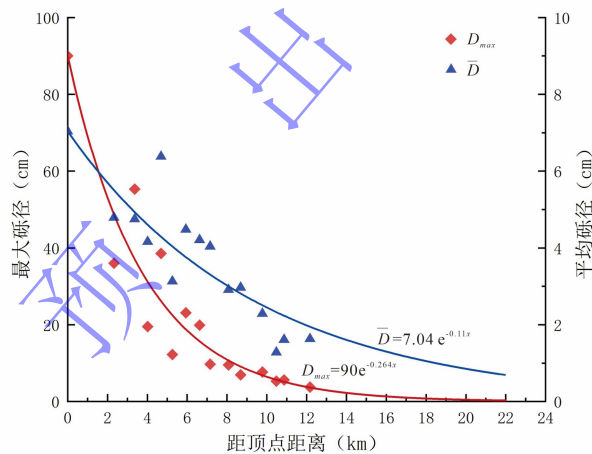


图 8 最大砾石粒径、平均砾石粒径拟合曲线对比

Fig.8 Comparison of fitting curves for maximum and mean gravel sizes

4.2 分支河流体系沉积物粒径递减规律

大格勒河 DFS 发育重力流沉积,沉积物粒径较大,主要搬运营力为季节性河流,从顶点向末端沉积物粒径呈现连续递减的趋势,沉积物主要组分由砾质逐渐转变为砂质,泥质组分含量相对稳定。近端由于坡度较大,水动力强,沉积物粒径的递减速率通常较快;远端坡度较缓,水动力较弱,沉积物粒径递减速率较慢。以大格勒河流扇为例,就拟合优度而言最大砾石粒径指数拟合曲线的拟合优度 $R^2=0.88$,平均砾石粒径的拟合曲线 R^2 则为 0.77,最大

砾石粒径的拟合曲线的拟合程度更高,这可能是由于在粗粒沉积中最大砾石粒径更清晰地受水流能量衰减的控制,而平均砾石粒径的变化则受到更多因素(如风力、局部地形等)的干扰,故使用最大砾石粒径数据建立的指数关系模型对大格勒河扇砾石粒径递减的表征更为准确。结合最大砾石粒径的指数拟合曲线,建立沉积物粒度递减模式(图9):大格勒河DFS沉积物粒度范围分布较广,整体上粒度较大,以砾石为主,砾石粒级跨越巨砾到细砾。最大砾石粒径随搬运距离下降的规律符合指数拟合关系,根据砾石粒径细化速率差异,可将最大砾石粒径拟合曲线分为陡降段和缓降段。上扇I段水动力条件最强,为高能水环境,间歇性洪水携带大量砾石,平均砾石粒径在3.13~7.04 cm,最大砾石粒径可达19.88~90 cm,分选性较差,上扇I段表现出粗碎屑快速变细的特征,最大砾石粒径拟合曲线表现为陡降段,砾石粒径递减速率为三段最快,用割线斜率 k 代表该段最大砾石粒径平均细化速率为10.34,最大砾石粒径到上扇I段与上扇II段分界下降约77%。上扇II段水动力大幅度减弱,平均砾石粒径介于1.28~4.04 cm,最大砾石粒径较上扇I段存在突变,范围在3.76~9.7 cm,最大砾石粒径拟合曲线转变为缓降段, k 等于0.21,较陡降段大幅度下降,递减速率趋于平稳,从上扇I段到上扇II段砾石分选性有所改善。下扇水动力最弱,表现为低能水环境,砂质含量大于50%,较近端和中部显著增加,沉积物组成逐渐转变为砂,砾石多为细砾,搬运距离至22 km处砾石基本消失,预测DFS末端沉积物粒径为0.044 mm。

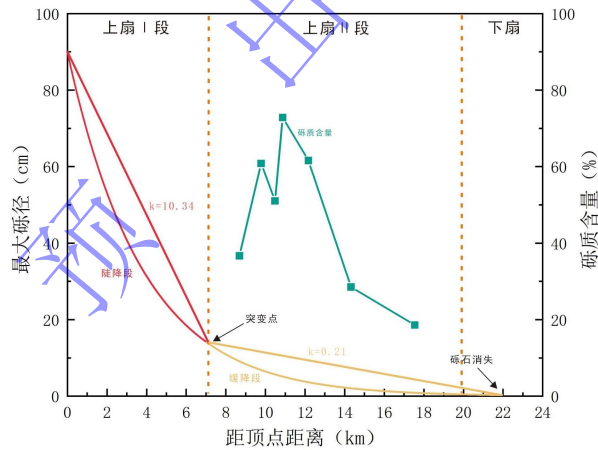


图9 大格勒河分支河流体系沉积物粒径递减模式

Fig.9 Downstream fining pattern of sediment grain size in the Dagele River distributive fluvial system

分支河流体系的沉积物粒径总体上呈现向下游变细的规律,对于气候环境相似、规模相近的扇体,沉积物粒度递减的规律通常具有相似性,如张祥辉等(2021)对疏勒河大型DFS(半径约为64.3 km)的砾石粒径随搬运距离的关系建立了定量公式: $D=46.206e^{-0.028x}$ (D 为砾石平均粒径,单位mm; x 为沉积物搬运距离,单位km),陈殿宝等(2018)对梨园河扇(半径约为33.7 km)的沉积物粒径沿程变化建立了定量关系: $D_{50}=288e^{-0.073x}$ (D_{50} 为沉积物中值粒径,单位mm; x 为沉积物搬运距离,单位km);陈进军(2017)建立了丰乐扇(半

径为 53.6 km) 砾石粒径随搬运距离变化的定量模型： $D_{50}=71.82e^{-0.079x}$ (D_{50} 为沉积物中值粒径，单位 mm； x 为沉积物搬运距离，单位 km)。以上对大型 DFS (半径 > 30 km) 建立的沉积物粒度递减模型均更符合指数关系，说明指数模型在对大型 DFS 沉积物粒度递减规律的定量分析中具有更好的效果，其中粒径递减系数受物源供给、水流能量等因素的综合影响。研究通过数学方法建立沉积物粒径与搬运距离间的定量关系，可为此类 DFS 和相似的沉积体系展布的定量预测提供一定的参考依据。同时，由于实际条件和资料限制，研究还存在一些局限性，如考察设置一条沿主要河道的考察路线，对粒径变化的空间性研究有所欠缺；由于一些客观因素，泉线以下的下扇无法进入以设置考察点，故主要对砾石沉积区进行研究；沉积物粒度递减规律还受到多种因素的共同控制，如地形、气候、人类活动干扰等，导致不同规模、不同类型的沉积体系间沉积物粒径范围及递减规律可能存在较大的差异，相同类型 DFS 间的规律也存在个例，如高志勇等 (2023) 的研究发现库车河 DFS 的砾石粒径递减规律则更符合线性关系： $D=10.379-0.1548x$ (D 为砾石平均粒径，单位 cm； x 为沉积物搬运距离，单位 km)。对于不同 DFS 间沉积物粒径递减规律的差异性仍需要进一步的研究。对于研究的空間性不足、不同 DFS 间的差异等问题，也为以后的研究提供了方向。

5 结论

(1) 大格勒河流扇沉积物组分整体上以砾石为主，砾石粒径较大，且变化范围广，P1 点最大砾石粒径可达 90 cm，有较粗且充足的物源供给。从顶点到末端沉积物逐渐变细，具有明显的分段特征，可分为上扇和下扇两个相带，上扇又可进一步分为 I 段和 II 段，上扇 I 段砾石粒径最大，最大砾石粒径范围为 19.88~90.00 cm，平均砾石粒径在 4.21~7.04 cm；上扇 II 段为砾质—砂质过渡带，最大砾石粒径范围在 3.76~9.70 cm，平均砾石粒径 1.63~4.04 cm；下扇沉积物以砂为主，沉积物粒度最小。

(2) 对沉积物粒径的拟合方法主要包括三种：线性拟合、指数拟合和幂函数拟合。对大格勒河流扇最大砾石粒径和平均砾石粒径的沿程变化进行拟合，并对各个拟合方法进行适应性分析，结果表明，基于指数函数的拟合方法对最大砾石粒径和平均砾石粒径建立的定量关系优于其他两种方法，所建立的定量关系模型分别为： $D_{\max}=90e^{-0.264x}$ ， $\bar{D}=7.04e^{-0.11x}$ 。同时对最大砾石粒径和平均砾石粒径的指数拟合结果进行比较分析，发现最大砾石粒径的拟合结果更为准确，水力分选在沉积物粒径递减中的作用显著。

(3) 根据大格勒河 DFS 沉积物整体变化特征及所建立的最大砾石粒径沿程变化定量关系模型，建立了大格勒河 DFS 沉积物递减模式，研究结果为此类 DFS 沉积体系展布的定量预测提供了参考依据。

致谢 感谢审稿专家及期刊编辑提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 陈殿宝, 陈进军, 胡小飞, 等. 2018. 祁连山北麓梨园河沉积物粒径的变化特征与分析[J]. 第四纪研究, 38 (6): 1336-1347. [Chen Dianbao, Chen Jinjun, Hu Xiaofei, et al. 2018. Characteristics and analysis on the sediment grain size along the Liyuan River on the north piedmont of the Qilian Shan[J]. Quaternary Sciences, 38(6): 1336-1347.]
- 陈进军. 2017. 冲积河流沉积物粒径的变化特征及其影响因素分析: 以祁连山北麓为例[D]. 兰州: 兰州大学. [Chen Jinjun. 2017. Characteristics of sediment grain size and the influence factors in alluvial rivers—A case study from the north piedmont of the Qilian Shan[D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 高志勇, 冯佳睿, 石雨昕, 等. 2023. 干旱气候下冲积扇—冲积平原曲流河沉积演化过程与展布: 以新疆库车河现代沉积为例[J]. 沉积学报, 41 (6): 1954-1969. [Gao Zhiyong, Feng Jiarui, Shi Yuxin, et al. 2023. Sedimentary evolution and distribution characteristics of alluvial fan and meandering rivers in an alluvial plain with an arid climate: A case of modern sedimentation in the Kuqa River, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(6): 1954-1969.]
- 焦和. 2013. 格尔木市大格勒沟脑地区金的成矿及远景评价[D]. 北京: 中国地质大学 (北京). [Jiao He. 2013. In daGeleGouNao regions ore-forming and prospective evaluation of the gold[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 兰亚萍, 李勇, 丘东洲, 等. 2009. 黄骅坳陷孔南地区孔店组冲积扇沉积特征及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 29 (4): 22-28. [Lan Yaping, Li Yong, Qiu Dongzhou, et al. 2009. Alluvial fan deposits in the Kongdian Formation, Huanghua Depression[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 29(4): 22-28.]
- 李相博, 刘化清, 邓秀芹, 等. 2021. 干旱环境河流扇概念与鄂尔多斯盆地延长组“满盆砂”成因新解[J]. 沉积学报, 39(5): 1208-1221. [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Deng Xiuqin, et al. 2021. The concept of fluvial fans in an arid environment: A new explanation of the origin of “sand-filled basins” in the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(5): 1208-1221.]
- 刘宗堡, 张云峰, 刘云燕, 等. 2018. 末端扇沉积体系研究现状及石油地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 47 (3): 520-530, 537. [Liu Zongbao, Zhang Yunfeng, Liu Yunyan, et al. 2018. Status quo of the terminal fan sedimentary system study and its petroleum geological significance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 47(3): 520-530, 537.]
- 孙家惠, 张昌民, 王浩楠, 等. 2024. 分支河流体系河道弯度沿程变化规律: 以格尔木河流扇为例[J]. 沉积学报, 42 (3): 981-993. [Sun Jiahui, Zhang Changmin, Wang Haonan, et al. 2024. Downstream river channel sinuosity variation of the distributive fluvial system: A case study from the Golmud fluvial fan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(3): 981-993.]
- 王富春, 王贵仁. 2001. 1:25 万水系沉积物测量在柴达木周边地区金矿找矿工作中的应用及其效果[J]. 青海地质, (增刊 1): 36-40. [Wang Fuchun, Wang Guiren. 2001. Application of 1: 25000 stream sediment survey to gold-prospecting around Qaidum Basin and its effect[J]. Management & Strategy of Qinghai Land & Resources, (Suppl.1): 36-40.]
- 王令辉, 张昌民, 张祥辉, 等. 2025. 柴达木盆地格尔木扇河网密度沿程变化规律[J]. 沉积学报, 43 (2): 609-621. [Wang Linghui, Zhang Changmin, Zhang Xianghui, et al. 2025. Variation of the drainage density of the golmud fan in Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(2): 609-621.]
- 王洋, 张昌民, 冀冬生, 等. 2025. 基于粒径递减规律定量预测的冲积扇沉积体系展布: 以准噶尔盆地南缘喀拉扎组为例[J]. 大庆石油地质与开发, 44 (4): 60-70. [Wang Yang, Zhang Changmin, Ji Dongsheng, et al. 2025. Quantitative predicted alluvial fan sedimentary system extension based on grain size downstream fining law: A case study of Kalazha Formation in southern margin of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 44(4): 60-70.]
- 吴胜和, 范峥, 许长福, 等. 2012. 新疆克拉玛依油田三叠系克下组冲积扇内部构型[J]. 古地理学报, 14 (3): 331-340. [Wu Shenghe, Fan Zheng, Xu Changfu, et al. 2012. Internal architecture of alluvial fan in the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay oilfield, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 14(3): 331-340.]
- 吴锡浩, 钱方. 1964. 川江徐家沱—金刚沱河段现代河床砾石粒度及形态变化的初步分析[J]. 地质论评, 22(4): 289-297. [Wu Xihao, Qian Fang. 1964. Preliminary analysis of the changes in particle size and morphology of modern riverbed gravel in the Xujiatuo - Jingangtuo Section of the Chuanjiang River[J]. Geological Review, 22(4): 289-297.]
- 吴智勇, 郭建华, 吴东胜, 等. 1999. 东濮断陷湖盆下第三系沙二段的冲积扇沉积[J]. 沉积学报, 17 (3): 449-453. [Wu Zhiyong,

- Guo Jianhua, Wu Dongsheng, et al. 1999. Alluvial fan in Paleogene Shahejie Formation, Dongpu Faulted-Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(3): 449-453.]
- 徐安娜, 郑红菊, 董月霞, 等. 2006. 南堡凹陷东营组层序地层格架及沉积相预测[J]. *石油勘探与开发*, 33(4): 437-443. [Xu Anna, Zheng Hongju, Dong Yuexia, et al. 2006. Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies prediction in Dongying Formation of Nanpu Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 33(4): 437-443.]
- 杨帆, 贾进华. 2006. 塔里木盆地乌什凹陷白垩系冲积扇—扇三角洲沉积相及有利储盖组合[J]. *沉积学报*, 24(5): 681-689. [Yang Fan, Jia Jinhua. 2006. Alluvial fan and fan-delta sedimentary facies and favorable assemblage of reservoir and seal of Wushi Sag (Cretaceous) in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(5): 681-689.]
- 张昌民, 胡威, 朱锐, 等. 2017. 分支河流体系的概念及其对油气勘探开发的意义[J]. *岩性油气藏*, 29(3): 1-9. [Zhang Changmin, Hu Wei, Zhu Rui, et al. 2017. Concept of distributive fluvial system and its significance to oil and gas exploration and development[J]. *Lithologic Reservoirs*, 29(3): 1-9.]
- 张昌民, 宋新民, 支东明, 等. 2020. 陆相含油气盆地沉积体系再思考：来自分支河流体系的启示[J]. *石油学报*, 41(2): 127-153. [Zhang Changmin, Song Xinmin, Zhi Dongming, et al. 2020. Rethinking on the sedimentary system of terrestrial petroliferous basins: Insights from distributive fluvial system[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 41(2): 127-153.]
- 张昌民, 张祥辉, Hartley A J, 等. 2023. 分支河流体系分类初探[J]. *岩性油气藏*, 35(4): 1-15. [Zhang Changmin, Zhang Xianghui, Hartley A J, et al. 2023. On classification of distributive fluvial system[J]. *Lithologic Reservoirs*, 35(4): 1-15.]
- 张祥辉, 张昌民, 冯文杰, 等. 2019. 苏干湖盆地周缘分支河流体系的几何形态及影响因素分析[J]. *地质学报*, 93(11): 2947-2959. [Zhang Xianghui, Zhang Changmin, Feng Wenjie, et al. 2019. Geometry and control factors of distributive fluvial system around the Sugan Lake Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2947-2959.]
- 张祥辉, 张昌民, 冯文杰, 等. 2021. 干旱地区分支河流体系沉积特征：以疏勒河分支河流体系为例[J]. *石油勘探与开发*, 48(4): 756-767. [Zhang Xianghui, Zhang Changmin, Feng Wenjie, et al. 2021. Sedimentary characteristics of distributive fluvial system in arid area: A case study of the Shule River distributive fluvial system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(4): 756-767.]
- 张元福, 戴鑫, 王敏, 等. 2020. 河流扇的概念、特征及意义[J]. *石油勘探与开发*, 47(5): 947-957. [Zhang Yuanfu, Dai Xin, Wang Min, et al. 2020. The concept, characteristics and significance of fluvial fans[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 947-957.]
- 张元福, 王敏, 张森, 等. 2023. 现代河流扇的全球分布、类型及控制因素[J]. *地学前缘*, 30(4): 389-404. [Zhang Yuanfu, Wang Min, Zhang Sen, et al. 2023. Modern fluvial fans: Global distribution, fan types and controlling factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 389-404.]
- Agarwal R P, Bhoj R. 1992. Evolution of Kosi river fan, India: Structural implications and geomorphic significance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 13(10): 1891-1901.
- Barrell J. 1925. Marine and terrestrial conglomerates[J]. *GSA Bulletin*, 36(2): 279-342.
- Blair T C. 1999. Sedimentary processes and facies of the waterlaid Anvil Spring Canyon alluvial fan, Death Valley, California[J]. *Sedimentology*, 46(5): 913-940.
- Blair T C. 2000. Sedimentology and progressive tectonic unconformities of the sheetflood-dominated Hell's Gate alluvial fan, Death Valley, California[J]. *Sedimentary Geology*, 132(3/4): 233-262.
- Blair T C, McPherson J G. 2009. Processes and forms of alluvial fans[M]//Parsons A J, Abrahams A D. *Geomorphology of desert environments*. Dordrecht: Springer, 413-467.
- Brierley G J, Hickin E J. 1985. The downstream gradation of particle sizes in the Squamish river, British Columbia[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10(6): 597-606.
- Clarke L, Quine T A, Nicholas A. 2010. An experimental investigation of autogenic behaviour during alluvial fan evolution[J]. *Geomorphology*, 115(3/4): 278-285.
- Daubrée A. 1879. *Etudes synthétiques de géologie expérimentale*[M]. Paris: Dunod.
- Dingle E H, Sinclair H D, Attal M, et al. 2016. Subsidence control on river morphology and grain size in the Ganga Plain[J]. *American Journal of Science*, 316(8): 778-812.

- Duller R A, Whittaker A C, Fedele J J, et al. 2010. From grain size to tectonics[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3): F03022.
- Hartley A J, Weissmann G S, Nichols G J, et al. 2010. Large distributive fluvial systems: Characteristics, distribution, and controls on development[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 80(2): 167-183.
- Krumbein W C. 1937. Sediments and exponential curves[J]. *The Journal of Geology*, 45(6): 577-601.
- Krumbein W C. 1942. Flood deposits of Arroyo Seco, Los Angeles County, California[J]. *GSA Bulletin*, 53(9): 1355-1402.
- Rice S. 1999. The nature and controls on downstream fining within sedimentary links[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1): 32-39.
- Sternberg H. 1875. Untersuchungen uber Langen-und Querprofil geschiebefuhrender Flusse[J]. *Zeitschrift fur Bauwesen*, 25: 483-506.
- Weissmann G S, Hartley A J, Nichols G J, et al. 2010. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: Distributive fluvial systems[J]. *Geology*, 38(1): 39-42.
- Whittaker A C, Duller R A, Springett J, et al. 2011. Decoding downstream trends in stratigraphic grain size as a function of tectonic subsidence and sediment supply[J]. *GSA Bulletin*, 123(7/8): 1363-1382.

Quantitative Analysis of Downstream Fining Pattern in Fluvial Fans: A case study of the Dagele River, Qaidam Basin

LU JiaChen, ZHANG ChangMin, WANG LingHui, WANG HaoNan, SUN JiaHui, ZHANG XiangHui, GUO Jun, YANG YuXin

School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: [Objective] The study aimed to establish a quantitative model of downstream grain-size diminution in large-scale distributive fluvial systems (fluvial fans), and thus provide a knowledge base for predicting the distribution of sedimentary systems in intelligent oil and gas exploration and development. [Methods] Detailed descriptions of channel morphology and sediment grain size were conducted in the Dagle fluvial fan of the Qaidam Basin, Qinghai, by combining field investigations with Google Earth, 91 Wei Tu, and ImageJ geographic information software. Appropriate methods were selected to fit grain-size variation curves, and the longitudinal changes in gravel size were summarized. [Results] It was found that the sediment grain size of the Dagle fluvial fan is generally coarse, being dominated by gravels with a maximum clast size up to 90 cm at the apex of the fan, and a clearly diminishing trend from the apex to the distal end. Exponential functions produced the best fit of the trend of gravel-size diminution: for maximum clast size vs. distance, $D_{\max} = 90e^{-0.264x}$; for average clast size vs. distance, $\bar{D} = 7.04e^{-0.11x}$. The critical role of hydraulic sorting in grain-size diminution is highlighted by comparing these exponential models. Within the study area, the longitudinal decay model of maximum clast size is considered to effectively reflect the grain-size variation trend of the entire distributive fluvial system, leading to the establishment of a sediment-diminution model for the Dagle distributive fluvial system. [Conclusions] Sediment grain-size variation is closely related to the source, the sediment supply, the hydrodynamic conditions and the depositional environment, among other factors. This study provides a knowledge base for quantitative sedimentary facies prediction and depositional system scale estimation in large-scale distributive fluvial systems.

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42130813, 42472168.

Corresponding author: ZHANG ChangMin, E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn.

Key words: distributive fluvial systems; sediment particle size; quantitative analysis; Qaidam Basin; Dagle fluvial fan

